As
B
Baldet, Fernand
La constitution des comètes.

As
B

AS
B

CONFÉRENCES D'ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES
XVI

LA
CONSTITUTION DES COMÈTES

UNIVERSITY OF TORONTO LIBRARY

CONFÉRENCE

FAITE AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS
LE 14 MAI 1930

PAR

F. BALDET

ASTRONOME ADJOINT A L'OBSERVATOIRE DE PARIS

483665
8.1.49

PARIS
LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET Cie
6, RUE DE LA SORBONNE, 6

1930

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.

Copyright 1930 by Librairie scientifique Hermann
et Cie, Paris.

LA CONSTITUTION DES COMETES

Par F. Baldet,

Astronome adjoint à l'Observatoire de Paris.

---

1. — Les recherches effectuées dans les observatoires depuis le début du xx^{e} siècle ont apporté de nombreux éclaircissements sur la constitution de ces astres étranges que sont les comètes. Cependant celles-ci soulèvent encore bien des problèmes qui n'ont pas été résolus, mais dont on peut entrevoir les solutions prochaines grâce aux progrès considérables accomplis depuis quelques années par la physique théorique et expérimentale.

Nous allons exposer, dans cette conférence, l'état actuel de la question en marquant bien la séparation entre les phénomènes connus avec certitude et les hypothèses explicatives actuellement proposées.

2. **Difficultés spéciales des observations.** — Et d'abord, pour bien comprendre les raisons des difficultés particulières et de la lenteur des recherches dans ce domaine, alors que d'autres branches de l'astrophysique font des progrès rapides, il faut se rappeler que l'observateur de comètes n'a pas ces astres à sa disposition en tout temps, comme ses collègues plus fortunés qui étudient le Soleil, les étoiles ou les nébuleuses. Les belles comètes sont très rares et la plupart arrivent sans être attendues.

Il faut également se rappeler que les conditions propices aux observations ne sont qu'exceptionnellement remplies. Elles sont même un peu contradictoires. Pour qu'une comète puisse être observée avec fruit il faut, en effet, qu'elle soit à la fois assez brillante et assez bien placée dans le ciel nocturne, puisque de longues poses photographiques sont à envisager. Or, une comète

est d'autant plus brillante qu'elle se trouve plus près du Soleil. Mais alors elle n'est visible que dans les lueurs du crépuscule ou de l'aurore, tout près de l'horizon, noyée dans ses brumes, observable pendant quelques instants seulement. Et même, certaines comètes passent si près du Soleil que leur période de plus grand éclat se produit en plein jour, comme ce fut le cas en décembre 1927 avec la comète Skjellerup, pour ne citer que la dernière.

Si, par contre, l'astre est assez brillant lorsque la nuit est complète, c'est qu'il passe non loin de la Terre. A cause de son mouvement angulaire rapide (plusieurs degrés par jour), sa période de visibilité est courte, et il faut compter malheureusement avec le mauvais temps ou la présence de la Lune, qui en abrègent encore la durée.

3. Les trois parties d'une comète. — Avant de vous exposer les résultats récemment acquis, permettez-moi de vous rappeler quelques données dont nous allons avoir besoin.

On distingue dans une comète trois parties : le *noyau*, la *chevelure* et la *queue*. L'ensemble du noyau et de la chevelure forme la *tête*.

Ces trois régions, sauf peut-être le noyau, n'ont pas de limites précises. En particulier, la chevelure et la queue paraissent souvent confondues surtout lorsque les comètes sont près du Soleil. Lorsqu'elles en sont suffisamment éloignées, elles n'ont pas de queue. Il arrive même souvent que le noyau, dont l'aspect est plus ou moins stellaire, reste invisible.

4. Dimensions et formes. — Les dimensions des comètes sont très variables, mais toujours très grandes.

La chevelure est, le plus souvent, presque ronde, et son diamètre peut être compris entre celui de la Terre et celui du Soleil, et même le dépasser. La tête de la comète 1881 I atteignit, par exemple, 1.800.000 kilomètres (le soleil mesure 1.300.000 kilomètres de diamètre). Mais, pour une même comète, la chevelure varie considérablement suivant sa distance au Soleil et même d'un jour à l'autre, selon son activité propre.

En général, et contrairement à ce qu'on pourrait penser au premier abord, la tête d'une comète diminue à mesure qu'elle se rapproche du Soleil. La comète périodique de Encke, qui revient au périhélie tous les trois ans et huit mois, est, à cet égard, tout

à fait remarquable. A la distance de 210 millions de kilomètres du Soleil (1,4 unité astronomique) [1], son diamètre atteint 480.000 kilomètres pour tomber à 20.000 kilomètres, soit un volume 10.000 fois moindre, lorsqu'elle arrive à son périhélie, à 51 millions de kilomètres (0,34 unité) du Soleil.

Ce phénomène peut être attribué, tout au moins dans ses grandes lignes, à la force répulsive du Soleil, quoique l'explication complète paraisse rencontrer d'assez grosses difficultés.

Le noyau occupe le plus souvent une position excentrique dans la chevelure. Il a un aspect stellaire ou diffus, et on lui attribue encore actuellement des dimensions variant de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres. Nous verrons ce qu'il faut en penser tout à l'heure.

C'est sur le noyau qu'on effectue, à l'équatorial, les pointés micrométriques pour obtenir la position de la comète, et c'est lui qui parcourt l'orbite képlérienne dont les éléments sont donnés dans les recueils spéciaux. Lorsqu'il est absent, l'observateur pointe au mieux la région la plus brillante de la chevelure. Il ne faut pas s'étonner, dans ces conditions, si l'orbite de la comète présente quelque incertitude, puisque la position du centre de gravité n'est pas exactement déterminée. En particulier, l'excentricité reste un peu douteuse, et, lorsqu'elle est très près ou égale à l'unité, une erreur de pointé de quelques secondes d'arc fait passer aisément l'orbite de l'ellipse à la parabole ou l'hyperbole.

Du noyau partent des émissions en aigrettes ou en nappes hémisphériques dirigées vers le Soleil au départ et qui se recourbent sous l'action de la force répulsive solaire, comme des jets d'eau sortant d'une pomme d'arrosoir.

Dans quelques comètes on a signalé plusieurs noyaux ou tout au moins plusieurs condensations plus ou moins diffuses.

La queue s'échappe de la tête du côté opposé au Soleil. Elle révèle, lorsqu'on l'étudie photographiquement avec les grands télescopes, une structure complexe, filamenteuse, tout au moins près de la tête, qui échappe à l'observation visuelle. Animés de mouvements rapides, ces fins détails ne peuvent être enregistrés qu'avec des poses de quelques minutes seulement et sont, par cela même, assez peu connus. D'autre part, des nuages, des con-

(1) L'unité astronomique est la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit 149.500.000 kilomètres.

densations nébuleuses, s'y déplacent à des vitesses de plusieurs kilomètres ou même de plusieurs dizaines de kilomètres à la seconde.

L'état actuel de la photographie ne permet pas encore d'obtenir une image cométaire complète en quelques secondes, mais lorsque la sensibilité des émulsions aura été accrue dans de larges proportions (sans nuire à la finesse du grain), le film qu'on pourrait en obtenir et qu'on projetterait à l'accéléré donnerait une vision vraiment intéressante des mouvements rapides de la matière dans les comètes.

La grandeur des queues est des plus variable. En s'éloignant du Soleil, elles finissent pas disparaître, mais, en s'en rapprochant, elles s'allongent et atteignent des dimensions prodigieuses. Par exemple, et pour ne citer que les plus célèbres, la queue de la comète 1811 I avait 176 millions de kilomètres; celle de 1847 I, 210 millions; celle de 1680, 240 millions, et celle de 1843 I, 320 millions de kilomètres, plus de deux fois la distance de la Terre au Soleil.

Ces nombres ne représentent du reste pas des mesures rigoureuses, mais plutôt un ordre de grandeur, car l'extrémité des queues cométaires est très diffuse, celles-ci s'affaiblissent peu à peu et s'évanouissent sur le fond obscur du ciel nocturne. Les longues poses photographiques avec des appareils très lumineux les montrent sur de plus grandes étendues que l'observation visuelle.

Les queues sont situées le plus souvent dans le plan de l'orbite de la comète. Cependant des travaux récents prouvent que certaines d'entre elles s'en sont assez fortement écartées.

5. Masses. — Quant aux masses des comètes, elles sont certainement très faibles, astronomiquement parlant. Pour les déterminer avec sécurité, sinon avec précision, il faudrait qu'en passant assez près d'une planète, ou mieux près d'un de ses satellites, elles y produisissent des perturbations sensibles. Or, à chaque fois que le cas s'est présenté, elles n'ont causé aucun effet perceptible, alors qu'elle-mêmes, sous l'action de la planète, changeaient complètement de route. Par exemple, la comète Brooks (1889 V) a traversé, en 1886, tout le système des satellites de Jupiter, sans modifier leurs orbites, tandis que sa période de révolution variait de vingt-sept à sept ans. De cas analogues, on a pu déduire que la limite supérieure de leur masse

est le 1/10.000e de celle de la Terre. En réalité, elles doivent être le plus souvent beaucoup moins importantes et leur densité moyenne considérablement plus faible que celle de notre atmosphère.

ANALYSE SPECTRALE

Nous n'insisterons pas davantage sur ces premières données fournies par la simple observation visuelle télescopique ou photographique. Mais il était nécessaire de les rappeler, avant d'arriver au cœur même de notre sujet, avec l'application de l'analyse spectrale aux comètes.

Nous y distinguons trois étapes.

6. Première étape : Observations visuelles. — Elle débute par l'observation visuelle du spectre de la comète Tempel II faite à Florence par Donati le 5 août 1864. Cette première observation révéla un fait inattendu : la comète brillait d'une lumière propre donnant un spectre de trois bandes ou « raies claires », ressemblant « aux spectres produits par les métaux », et non par la seule lumière solaire réfléchie. Les observations effectuées sur les comètes qui suivirent confirmèrent cette première constatation et montrèrent, dès le 9 janvier 1866, sur la comète Tempel (1865 *f*) observée par W. Huggins, qu'à ce spectre discontinu, caractéristique des gaz et vapeurs incandescents, s'ajoutait presque toujours un spectre continu.

Les trois bandes lumineuses caractéristiques que l'on devait retrouver dans toutes les comètes lorsque les méthodes se perfectionnèrent, furent identifiées, le 23 juin 1868, par Huggins, avec celles du spectre de Swan. Ces bandes sont visibles dans un grand nombre de flammes carbonées : bougie, arc, etc., et avec l'étincelle éclatant dans le gaz oléfiant; la théorie moderne des spectres de bandes les attribue à la molécule neutre C_2.

L'existence du carbone ou, comme on disait alors et jusqu'à ces dernières années, des « hydrocarbures » dans la substance si raréfiée des comètes était absolument inattendue. Cette remarquable et importante découverte fut diversement accueillie. Contestée pendant assez longtemps par certains, elle a pris définitivement place aujourd'hui en science et ne saurait plus être révoquée en doute.

7. Deuxième étape : Observations photographiques. — La fabrication industrielle des plaques sèches au gélatino-bromure d'argent, vers 1880, détermina un progrès rapide en astronomie. Grâce à ces nouvelles plaques, à sensibilité élevée, dont on pouvait s'approvisionner dans le commerce, toujours prêtes pour l'emploi, et qu'on pouvait garder des heures et même des jours dans un châssis sans voir leurs propriétés se modifier, l'étude des comètes et de leur spectre entra dans une phase nouvelle.

Ce fut le 24 juin 1881 que Huggins, à Upper Tulse Hill, en Angleterre, photographia le premier le spectre d'une comète. Avec une heure de pose, il obtint un bon spectrogramme de la belle comète 1881 *b* qui lui révéla l'existence de nouvelles bandes lumineuses dans les régions violette et ultra-violette restées jusque-là inexplorées. Ces bandes appartenaient à un autre spectre du carbone dit du « cyanogène », bien visible en particulier dans l'arc entre charbons, et qu'on sait appartenir aujourd'hui à la molécule neutre CN. A ces bandes s'ajoutaient quelques radiations non identifiées vers $\lambda = 4.050$ Å.

En outre, le faible spectre continu, déjà constaté visuellement, avait impressionné la plaque et montrait distinctement les raies sombres de Fraunhofer de la lumière solaire, révélant ainsi son origine.

Huggins, à qui nous sommes, comme on le voit, grandement redevable de nos premières connaissances sur les spectres de ces corps célestes, venait ainsi d'ajouter une nouvelle preuve de l'existence du carbone dans leurs gaz raréfiés. Il y découvrait en outre l'azote et apportait la preuve irréfutable — après celle qu'avait donnée Arago, en 1819, par la polarisation — que ces astres, dont la matière est dans un état d'extrême ténuité, et paraissent tout à fait transparents lorsqu'ils passent devant une étoile, diffusaient cependant la lumière solaire d'une manière notable.

Le début de cette seconde période est marqué par l'apparition de cinq comètes brillantes : 1881 *b*, 1881 *c*, 1882 *a*, 1882 *b*, 1883 *b*, qui furent très étudiées. Les quatre premières, dont la distance périhélie était petite, montrèrent, en passant près du Soleil, un élément nouveau : le *sodium*.

Les deux raies d'émission furent aisément dédoublées, D_2 étant toujours plus brillante que D_1, et de leur déplacement, par rapport aux mêmes raies données par une source terrestre, on en déduisit la vitesse radiale de l'astre : elle était en complet accord avec celle calculée d'après les éléments de l'orbite.

Lohse et Copeland crurent apercevoir le spectre du fer dans la comète 1882 *b*, à l'époque de son plus grand rapprochement du Soleil. Le 18 septembre 1882, ils virent apparaître pendant un quart d'heure (seuls sur treize observateurs) cinq raies brillantes qu'ils attribuèrent à cet élément.

Quoique l'apparition de vapeurs de fer dans une comète, en raison de son passage près de la surface solaire, n'ait rien d'impossible, l'étude critique de l'identification de Lohse et Copeland, à laquelle je me suis livré en me basant sur les données spectrales actuelles, n'a pas entraîné ma conviction. A mon avis, il y a lieu de n'accueillir cette identification, donnée comme certaine par ses auteurs et reproduite un peu partout comme telle, qu'avec une extrême réserve.

8. Troisième étape : Prisme-objectif. — En 1902, M. A. de la Baume Pluvinel eut l'idée de compléter les deux méthodes d'observation précédentes par celle du prisme-objectif. Celui-ci consiste simplement en un prisme situé devant un objectif photographique; il ne comporte donc pas de collimateur et par conséquent pas de fente. Très lumineux, il permet d'obtenir des images monochromatiques des différentes parties des comètes. Mais il faut que l'instrument soit adapté à ce genre de recherches : Draper, en 1881, Thollon et Gouy, en 1882, avaient bien essayé un instrument analogue, mais sans succès. Une étude attentive de la question conduisit M. A. de la Baume Pluvinel à l'emploi d'un appareil très lumineux, à court foyer, dont l'usage s'est répandu depuis dans tous les observatoires et auquel nous devons le meilleur de nos connaissances sur la constitution des comètes.

Le premier cliché réussi se rapporte au spectre de la comète 1902 *b;* il fut obtenu à Paris le 24 octobre 1902. Mais c'est surtout à partir de 1907 que les progrès devinrent rapides grâce à l'arrivée d'assez belles comètes toutes du plus haut intérêt. C'est alors qu'on eut, pour la première fois, connaissance du spectre remarquable émis par les queues.

9. Résultats. — En réunissant et comparant les spectres obtenus au prisme-objectif, on remarque vite que presque tous présentent une similitude frappante, et cela d'autant plus que les comètes auxquelles ils appartiennent se trouvaient au moment de leur étude à des distances du Soleil peu différentes les unes des autres.

Dans l'exposé des résultats qui va suivre, nous laisserons provisoirement de côté les spectres donnés par les quelques comètes à faible distance périhélie à l'époque de leur passage près du Soleil pour en parler plus loin.

Nous ajouterons aux documents apportés par l'analyse spectrale les données fournies soit par la photographie, soit par l'observation visuelle, qui concourent à préciser, compléter ou modifier les idées que nous avons rappelées au début sur la constitution des comètes.

10. La tête. — Il est remarquable que le spectre émis par la tête soit presque toujours le même, quelle que soit la comète, à une ou deux exceptions près signalées au début des observations visuelles.

Il consiste essentiellement dans les deux groupes de bandes déjà signalés et depuis longtemps connus en laboratoire où on les reproduit avec facilité : celui du cyanogène et celui du spectre de Swan. Les enveloppes gazeuses émises par le noyau donnent également ces deux mêmes groupes de bandes. On ne les a jamais vus s'étendre au loin dans la queue.

Lorsque la distance de la comète au Soleil varie, les intensités relatives de ces deux groupes changent : le spectre du cyanogène devient plus intense que celui de Swan au fur et à mesure que la comète se rapproche du Soleil.

La molécule CN donne, dans certaines conditions d'excitation, un groupe de bandes dans le rouge dont nous avons constaté l'existence dans le spectre de la comète Daniel (1907 *c*).

10 *bis*. Le noyau. — La distinction que nous avons rappelée plus haut entre le noyau diffus et le noyau stellaire est fondamentale et il convient d'y insister.

Pour distinguer avec certitude le véritable noyau solide sur lequel nous avons si peu de renseignements, il faut un instrument à pouvoir séparateur élevé, donc à grande ouverture; et il faut, en outre, que la comète ne soit pas trop éloignée de la Terre.

Une étude générale de la question nous a montré, en effet, que le noyau devrait être beaucoup plus petit qu'on ne l'indique généralement, et il est très probable que son disque n'a jamais été vu. Quand on peut distinguer le noyau, celui-ci apparaît comme un point stellaire dont l'éclat dépend de l'instrument employé : plus cet instrument a une ouverture petite et plus l'observateur note une magnitude stellaire élevée. Ce paradoxe s'explique

aisément si l'on se rappelle que le noyau est situé au milieu de gaz relativement brillants avec lesquels il se confond d'autant mieux que la tache centrale de diffraction donnée par l'instrument est plus grande.

Une détermination de l'ordre de grandeur du noyau d'une comète a pu être faite dans de bonnes conditions, en 1927, avec la grande lunette de Meudon, dont l'objectif a 0 m. 83 d'ouverture. Le 27 juin, la comète Pons-Winnecke (1927 *c*) passa relativement près de la Terre, à 0,039 unité astronomique, soit 5.800.000 kilomètres. Seule la comète Lexell était passée plus près de nous le 1er juillet 1770 à 2.400.000 kilomètres. On voit combien les occasions sont rares.

La détermination du diamètre par la photométrie nous donna environ 400 mètres. Il faut voir en ce chiffre plutôt un maximum qu'un minimum (1).

Un autre exemple nous est fourni par la comète de Halley elle-même, dont le noyau paraissait brillant dans les petits instruments tandis qu'il ne put être décelé par M. Antoniadi avec la grande lunette. Nous pourrions encore citer les grandes comètes qui sont passées devant le Soleil en restant complètement invisibles.

Le noyau est généralement décrit comme étant constitué par un essaim de météores de petites dimensions, voyageant de conserve, retenus à faible distance les uns des autres par leur attraction de gravitation. Cette façon de voir s'appuie sur la liaison indubitable existant entre les essaims d'étoiles filantes, les météorites et les comètes.

Mais les objections à cette théorie sont nombreuses. Un tel essaim n'a pas une cohésion suffisante pour résister à l'activité des gaz qui s'en échappent avec des vitesses considérables, de l'ordre de 10 à 20 kilomètres à la seconde, d'après certains astronomes, supérieures, par conséquent, aux vitesses explosives habituelles.

Tout en faisant les plus expresses réserves sur la valeur de ces derniers nombres, tout au moins à l'instant du départ, il est

---

(1) Depuis que cette conférence a eu lieu, la comète Schwassmann-Wachmann (1930 *d*) est passée à 8.400.000 kilomètres de nous, le 30 mai 1930. Avec le même instrument, à Meudon, nous avons pu également fixer pour limite supérieure du diamètre du noyau 400 mètres environ. La coïncidence entre ces deux valeurs est digne de retenir l'attention.

cependant incontestable que les gaz ont souvent une activité considérable autour des noyaux. On en voit la preuve par les jets et enveloppes en mouvement incessant et rapide.

11. Hypothèse du noyau unique. — Aussi ne pouvons-nous admettre qu'un noyau cométaire soit constitué par un essaim de corpuscules dont la stabilité subsisterait à chaque retour près du Soleil et pendant des siècles. Conformément aux quelques observations que nous avons pu réunir, nous nous représentons le noyau comme un corps solide, une très grosse météorite si l'on veut, contenant des gaz occlus. Il les perd d'autant plus rapidement qu'il se rapproche davantage du Soleil et son existence, en tant qu'émetteur de gaz, doit être courte, astronomiquement parlant. Mais, sous l'influence de diverses causes parmi lesquelles il faut ranger sa structure propre et les variations de température que ce corps éprouve en se rapprochant du Soleil, nous devons admettre qu'il puisse se fissurer, se craqueler, se désagréger et semer sur sa route des météorites et des étoiles filantes. Ces corpuscules suivent, par conséquent, à peu près la même orbite tout en s'éloignant peu à peu les uns des autres, et la Terre les rencontre parfois dans sa course annuelle.

Il arrive que le noyau se brise en deux parties, et l'on observe deux comètes au lieu d'une. La désagrégation continuant, la comète se transforme en étoiles filantes. Les gaz occlus de chacun de ces petits corps sont rapidement dissipés dans le vide environnant, car le rapport de la surface au volume s'est considérablement accru. La comète cesse d'exister, mais on peut alors assister à une belle chute d'étoiles filantes comme ce fut le cas pour la comète de Biéla après sa rupture et sa disparition définitive du champ des télescopes. Si le noyau subsistait après la perte de ses gaz, et que ses dimensions soient suffisantes, il nous apparaîtrait comme une petite planète.

Nous ne proposons, naturellement, cette conception d'un noyau unique et petit qu'avec la prudence qui doit accompagner toute hypothèse scientifique, mais elle nous paraît actuellement la seule qui s'accorde avec l'ensemble des observations.

12. Rencontre avec la Terre. — Un tel noyau venant à rencontrer la Terre avec une vitesse de plusieurs dizaines de kilomètres à la seconde causerait au point d'impact et dans un rayon étendu des dégâts considérables, comme on l'a vu pour la grande météorite sibérienne de 1908 : tous les animaux et les végétaux

seraient anéantis, mais la catastrophe serait très localisée. Quant aux gaz, leur raréfaction est telle que leur présence dans notre atmosphère passerait inaperçue. L'oxyde de carbone émis par les moteurs d'autos en une journée, à Paris, est autrement dangereux.

Il semble bien, du reste, qu'une telle rencontre ait déjà eu lieu il y a quelque cinq ou six mille ans. Dans le désert de l'Arizona, près du Cañon Diablo, se trouve une énorme excavation circulaire de 1.200 mètres de diamètre et 180 mètres de fond, ayant toutes les caractéristiques géologiques d'un entonnoir produit par l'arrivée d'une masse qui a explosé. Elle a projeté tout autour des milliers de météorites ferreuses pesant jusqu'à 770 kilos.

13. Les gaz entourant le noyau. — Le noyau solide est entouré de gaz formant le plus souvent une condensation diffuse de quelques centaines de kilomètres, nettement plus brillante que le reste de la comète.

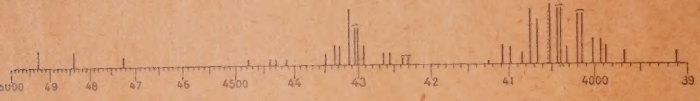
L'analyse spectrale de ces gaz montre d'abord qu'ils émettent les mêmes bandes lumineuses de Swan et du cyanogène que les gaz de la tête. Mais ils donnent aussi un certain nombre de radiations dont le groupe le plus important, déjà cité, se trouve dans l'extrême violet vers $\lambda = 4.050$ Å et qu'on ne retrouve jamais dans les autres régions de la comète. Ce spectre particulier aux gaz entourant le noyau est toujours le même, mais plus ou moins complet suivant son intensité. La raie la plus brillante dont la longueur d'onde est $\lambda = 4.051{,}6$ a toujours été signalée.

Or, ce spectre n'a jamais été obtenu jusqu'à présent en laboratoire. Les raies ou bandes trouvées par Raffety dans la flamme du bec Méker en 1916, avec lesquelles on a cru pouvoir l'identifier, ne donnent pas, d'après nos recherches, de coïncidences satisfaisantes.

Son origine reste donc mystérieuse. L'étude que nous en avons faite nous a permis de conclure que nous nous trouvions très probablement en présence d'un spectre de lignes émis par des gaz carbonés dans des conditions d'excitation particulières (fig. 1).

14. La queue. — Le spectre spécial émis par la queue a été observé pour la première fois dans la comète Daniel (1907 *c*). Mais c'est la comète Morehouse (1908 *c*) qui l'a présenté avec une intensité et une netteté incomparables.

Il est constitué par une série de bandes se présentant sous forme de doublets alternativement brillants et faibles, qui, à l'époque, étaient inconnus en laboratoire. Le physicien anglais Fowler put les reproduire en faisant jaillir la décharge électrique dans un gaz oxycarboné : CO ou CO^2, aussi raréfié que possible. Cette méthode ne donnant qu'une très faible luminosité et un spectre mélangé avec des bandes étrangères, nous avons repris la question et nous avons pu les obtenir avec une très grande intensité, sans bandes parasites, en un mot tels que nous les avions photographiés dans les comètes, en excitant de l'oxyde de carbone par un bombardement électronique provenant d'une cathode incandescente en tungstène. Les études théoriques récentes les ont attribués à la molécule d'oxyde de carbone ionisée : CO^+.



Les hauteurs des lignes sont proportionnelles à leurs intensités.

Fig. 1. — Raies caractéristiques, non identifiées, du Noyau des comètes.

Les bandes caractéristiques du groupe négatif de l'azote, appartenant à la molécule d'azote ionisée N_2^+, ont été observées dans trois comètes.

Le prisme-objectif a montré nettement que les bandes du cyanogène, du spectre de Swan ou les radiations du noyau n'ont jamais été observées au loin dans la queue. A chaque fois que le spectre d'une queue de comète a été obtenu (assez loin du Soleil), il a toujours présenté les bandes du CO^+.

En outre, lorsqu'un de ces astres a eu plusieurs queues, toutes ont émis le même spectre du CO^+. Cette importante constatation est en désaccord avec la théorie mécanique de Bessel-Bredichin sur la formation des queues des comètes à partir d'éléments de poids moléculaires différents. Il y a là une énigme dont la solution n'a pas encore été trouvée.

15. Comètes arrivant près du Soleil. — Lorsqu'une comète se rapproche du Soleil, sa température augmente et le noyau émet, en plus des gaz habituels, des vapeurs de sodium caractérisées au point de vue spectral par les deux raies D bien connues, généralement très fines et légèrement déplacées par suite de la vitesse de la comète, comme nous l'avons dit plus haut.

Ces vapeurs sont d'abord concentrées autour du noyau, et on est arrivé à les déceler dans la comète de Halley à la distance relativement considérable de 0,7 unité astronomique du Soleil. Plus près, elles se répandent dans toute la tête, puis dans la queue, et la comète brille d'une belle lumière jaune pâle. En même temps les bandes de Swan et du cyanogène diminuent beaucoup d'intensité. Les gaz de la queue émettent alors, en plus des raies du sodium, un spectre qui paraît continu avec les faibles dispersions employées, mais qui pourrait être dû à la fluorescence du sodium en présence des gaz carbonés, comme divers astronomes l'ont suggéré (Planche : comète 1910 *a*).

16. Comètes éloignées du Soleil. — Lorsque les comètes sont éloignées du Soleil, les bandes d'émission s'affaiblissent beaucoup et arrivent même à disparaître; la comète ne brille plus que par la diffusion de la lumière solaire, comme ce fut le cas pour la comète Holmes (1892 *f*) et pour celle de Halley en 1909, cent quatre-vingts jours avant son passage au périhélie. Cependant, il convient de noter que la comète Stearns, en 1927, a montré encore les bandes de Swan à la distance de 3,7 unités astronomiques.

17. Diffusion de la lumière solaire. — On a cru pendant longtemps que la lumière solaire diffusée par les comètes était due à des poussières ou particules solides tenues en suspension dans ses gaz. Cette hypothèse est devenue inutile depuis la découverte de la diffusion moléculaire des gaz, et l'on sait que le bleu du ciel n'a pas d'autre origine. M. Charles Fabry a repris la question, en se plaçant au point de vue de l'astrophysique. Il a chiffré l'importance de cette lumière diffusée dans le cas des comètes : ses conclusions sont en accord avec les observations et nous y souscrivons entièrement.

Récemment, on a cru pouvoir démontrer que le spectre continu appartenait à deux types nettement définis, l'un désigné sous le nom de « type solaire » et l'autre de « type violet ». Le premier aurait son maximum d'intensité dans le jaune et l'autre dans le violet. Les recherches, basées sur des tracés microphotométriques de spectres trop petits, n'ont pas permis à leur auteur de voir que le type violet était dû, non au spectre continu, mais au groupe de radiations violettes du noyau émises avec plus ou moins d'intensité.

En fait, il n'y a qu'un type de spectre continu : celui qui est donné par la lumière solaire diffusée, et la notion des deux types ne peut être conservée en astrophysique.

18. Spectres absents. — Il est tout à fait singulier qu'on n'ait jamais signalé les raies caractéristiques de l'hydrogène (série de Balmer) dans les comètes. Doit-on en conclure que ce gaz est absent? Ce n'est pas impossible. Sa légèreté et la facilité avec laquelle il diffuse lui ont sans doute permis de quitter le noyau peu après la formation de la comète, comme cela eut lieu pour

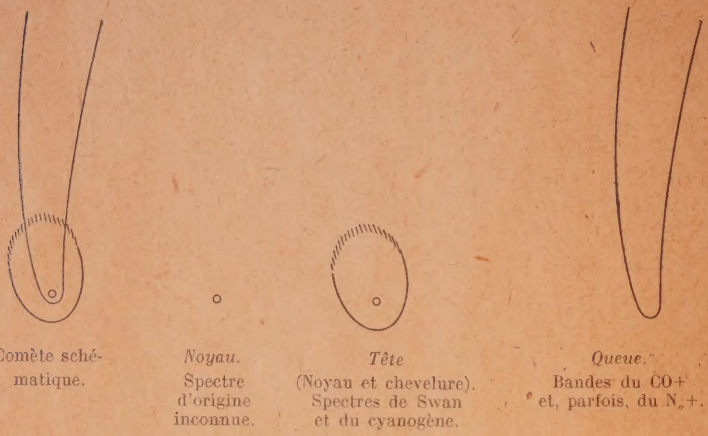


Fig. 2. — Répartition constante des différents spectres dans les comètes.

notre globe. Il est beaucoup plus difficile d'admettre que le processus d'excitation de la luminescence des autres gaz ne rende pas celui-ci lumineux.

On n'a jamais observé les raies de l'hélium, du « nébulium », du « coronium » ou de l'aurore polaire.

19. Répartition constante des spectres dans les comètes. — En résumé, on voit que le noyau, la chevelure et la queue donnent chacun — en plus du spectre continu plus ou moins intense — les spectres d'émission suivants (fig. 2) :

Pour le *noyau*, une série de radiations, toujours les mêmes, et qui n'ont pas encore été identifiées.

Pour la *tête*, formée de la chevelure et du noyau, les bandes de Swan et du cyanogène.

Enfin, pour la *queue*, des doublets de l'oxyde de carbone ionisé et, parfois, les bandes de la molécule d'azote ionisée. Ces doublets n'ont pas offert d'image de l'ensemble de la tête, comme on l'a noté à chaque fois que celle-ci s'est distinguée de la queue par ses dimensions.

Les intensités relatives de ces spectres sont, du reste, très variables.

Ces constatations sont fondamentales. Avec la connaissance du spectre des queues, elles constituent l'apport le plus important de l'application de la méthode du prisme-objectif à l'étude des comètes.

Ainsi, en résumé, les gaz des comètes contiennent du carbone, de l'azote, de l'oxygène et parfois du sodium sous des formes moléculaires qui sont presque toutes familières aujourd'hui aux spectroscopistes.

Nous avons réuni sur la planche insérée plus haut quatre spectres caractéristiques de comètes obtenus au prisme-objectif. Celui de la comète Morehouse montre les doublets du CO^+ donnés par la queue. Le premier cliché de la comète Brooks présente les bandes du cyanogène et de Swan de la tête, ainsi que les radiations du noyau très développées. C'est l'aspect classique des comètes ordinaires. Au-dessous se trouve un autre cliché de la même comète alors que sa queue s'était développée. Ces deux photographies montrent bien l'évolution du spectre en fonction de la distance de la comète au Soleil, Enfin, la dernière épreuve se rapporte à la grande comète 1910 *a*. Ici la queue offre le spectre continu dont nous avons parlé.

LA FORCE REPULSIVE DU SOLEIL

20. Pression de radiation. — On sait depuis l'antiquité que les queues des comètes sont opposées au Soleil. Une force répulsive émanant de l'astre central agit donc sur les gaz constitutifs dont ces queues sont formées, et l'on s'est naturellement demandé quelle pouvait être la nature de cette force qui agit en sens inverse de la gravitation.

La découverte de la *pression de radiation* parut en fournir une explication satisfaisante.

La force avec laquelle elle agit sur un corps étant proportionnelle à sa surface, tandis que l'attraction l'est à son volume, on voit que la pression de radiation peut l'emporter sur l'attrac-

tion pour des corps suffisamment petits, puisque le rapport de la surface au volume d'un corps croît lorsque ses dimensions linéaires décroissent. Les calculs de Schwarzschild montrèrent, en effet, que cette force, dans le cas de la lumière solaire, l'emportait sur l'attraction pour des particules de l'ordre du millième de millimètre, et ceci fut confirmé par des expériences de laboratoire. Mais, à cause des phénomènes de diffraction, cet accroissement de la force répulsive ne se poursuit pas indéfiniment : elle passe par un maximum pour des corpuscules dont les dimensions linéaires sont le tiers de la longueur d'onde de la lumière incidente, puis décroît ensuite pour devenir presque insensible lorsqu'on arrive aux dimensions moléculaires.

Or, nous avons vu que les queues sont gazeuses, ceci ne saurait faire aucun doute; il faut donc admettre qu'elles ne sont pas soumises, d'une manière sensible, à la pression de radiation calculée par Schwarzschild.

21. Pression de résonance. — Mais les progrès de la physique ont permis récemment d'envisager la question de la pression de la lumière sous un autre aspect.

Pour qu'il y ait pression sur une molécule, il faut que celle-ci absorbe une certaine quantité d'énergie. Elle ne peut le faire que si elle se conduit comme un résonateur et entre en vibration sous l'action de la radiation incidente : le phénomène prend alors le nom de *pression de résonance*.

Jusqu'à présent, l'existence de cette pression n'a pu être vérifiée en laboratoire à cause des difficultés expérimentales. Seule l'astrophysique peut nous fournir des documents en sa faveur.

Les calculs effectués par Baade et Pauli, en 1927, ont montré que la force répulsive désignée par $1 - \mu$, atteignait 151 pour la molécule CO^+ et 474 pour l'atome de sodium.

Or, les mesures de M. Bobrovnikoff sur la comète Morehouse lui ont montré que les nuages de CO^+ de la queue se déplaçaient avec des vitesses correspondant aux forces répulsives $1 - \mu = 151$ et $1 - \mu = 88$. D'autres observateurs ont constaté, dans la même comète, des forces répulsives qui sont multiples de 22 ou 23 et vont jusqu'à 156. Les explications proposées font intervenir des agglomérations de molécules, CO^+ et CO neutres, non sujettes à la pression de radiation.

Il semblerait, d'après ces premières indications, que l'action de la pression de résonance sur les comètes soit assez bien établie.

Malheureusement, il y a une ombre au tableau : des calculs tout récents de Unsöld ont montré que les valeurs trouvées par Baade et Pauli pour $1 - \mu$ devaient être multipliées par le coefficient 1/4, ce qui les ramène à 38 pour la molécule CO^+ et à 119 pour le sodium.

Nous n'insisterons pas davantage sur cette question, cependant si importante, parce qu'elle est loin d'être résolue. La force répulsive agissant sur les gaz des queues des comètes reste encore mystérieuse. Mais on voit, par cet exemple, l'intérêt que l'étude de ces astres présente non seulement pour l'astronome, mais aussi pour le physicien.

LA LUMINESCENCE DES GAZ DES COMETES

Une autre question est posée à la physique par la luminescence des comètes. Quelle peut en être la cause?

22. Hypothèse cathodique. — A l'heure actuelle deux hypothèses sont en présence : la première, énoncée par M. H. Deslandres, en 1895, est connue sous le nom d'hypothèse cathodique. Dans celle-ci on suppose que le Soleil émet des charges positives et négatives en quantités égales, tout au moins en moyenne, de manière que sa charge électrique totale conserve sa valeur d'équilibre. Les électrons sont lancés au loin et remplissent l'espace environnant.

En frappant les molécules gazeuses, ils excitent leur luminescence et peuvent les ioniser facilement.

Cette hypothèse a pour elle des arguments sérieux. Elle s'appuie d'abord sur le spectre des queues des comètes elles-mêmes que nous avons reproduit si facilement et avec exactitude en laboratoire par le bombardement électronique du CO, comme il a été dit plus haut.

Ce sont ensuite les remarquables travaux de Störmer sur l'aurore polaire. Il est en effet incontestable que certaines régions solaires, coïncidant souvent avec des taches, se signalent par une activité particulière et émettent un faisceau dirigé tournant avec le Soleil à peu près comme le ferait un rayon de phare. Ce faisceau, rencontrant la Terre à chaque révolution synodique, y déclanche des perturbations magnétiques, telluriques et des aurores. Pour nous arriver du Soleil, il met un temps variable qui atteint, en moyenne, une trentaine d'heures, alors que la lumière

ne met que huit minutes et demie. Ce n'est donc pas une radiation électro-magnétique. D'après Störmer il s'agirait d'un jet d'électrons.

En ce qui concerne la luminescence des comètes, il faut admettre que le Soleil émet des électrons, non seulement dans certaines directions privilégiées, mais aussi, quoique avec une moindre intensité, tout autour de lui puisque les comètes sillonnent l'espace en tous sens.

Cette émission d'électrons, qui se concentre en jets en certains points, pourrait ne pas avoir une structure homogène même à une distance relativement grande du Soleil. De nombreux observateurs ont vu, en effet, et nous-même l'avons aussi constaté, que les comètes varient légèrement d'éclat dans un espace de temps très court, de l'ordre de la minute. L'astre que l'on suit attentivement dans la lunette-guide de l'équatorial photographique au cours des longues poses conserve son même éclat pendant une demi-heure, par exemple, puis, en un temps qui peut n'être que d'une minute, son éclat diminue ou augmente dans toute la portion de la tête observée et, après des fluctuations variées, se stabilise.

Ce phénomène paraît bien réel; il n'est pas dû à des variations de transparence de notre atmosphère, car on ne le constate jamais sur les nébuleuses. On pourrait en trouver la raison avec l'hypothèse cathodique dans le passage de nuages électroniques plus ou moins denses.

23. Résonance optique. — La deuxième hypothèse est non moins intéressante, mais bien moins avancée. S'appuyant sur les phénomènes bien connus de résonance et de fluorescence optiques, elle ne met pas en jeu d'autres causes que la lumière solaire.

Une radiation peut être absorbée par une molécule gazeuse si sa période de résonance est en accord avec la longueur d'onde incidente. L'énergie ainsi absorbée est ensuite libérée soit avec la même fréquence (résonance optique) soit avec une fréquence moindre (fluorescence optique).

Les gaz de la comète, frappés par toute la gamme de radiations émises par le Soleil, qui se comporte à peu près comme un corps noir à 6.000° environ, entreraient en résonance avec celles de ces radiations qui leur conviennent. On a fait remarquer que, précisément, les bandes de Swan et du cyanogène émises par la

tête étaient absorbées par les molécules à l'état normal. Ce sont, en quelque sorte, les « bandes ultimes » des molécules, comme les raies D du sodium en sont les « raies ultimes ».

Mais cette hypothèse, travaillée d'abord par Schwarzchild et Kron et reprise récemment par Zanstra, qui a surtout traité numériquement le cas du sodium, n'est pas, malgré sa simplicité, sans présenter certaines difficultés.

Nous avons vu que les gaz de la queue étaient ionisés. Or, le potentiel d'ionisation de la molécule CO est de $14^{v},2$, et celui de la molécule N_2 est de $16^{v},5$. Pour provoquer leur ionisation, il faudrait donc que ces molécules soient frappées par des radiations ayant respectivement 870 et 750 Å. Celles-ci étant extrêmement absorbables par des traces de gaz, on doit se demander si l'atmosphère solaire : chromosphère supérieure et couronne, les laisse passer en quantité suffisante.

La question est encore trop peu avancée pour que j'y insiste davantage.

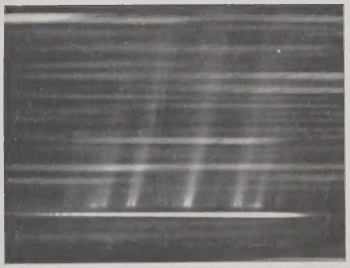
Du reste, les deux modes d'excitation par bombardement électronique et résonance optique ne s'excluent pas et il est possible qu'ils agissent tous deux simultanément.

24. — Quoi qu'il en soit, ces discussions, brièvement résumées ici, montrent tout l'intérêt des recherches poursuivies sur la constitution des comètes, en raison des importants problèmes qu'elles posent à l'astronomie et à la physique contemporaines.

15.848. — Bordeaux, Imprimerie Cadoret, 3, place Saint-Christoly, 3. — 1930.

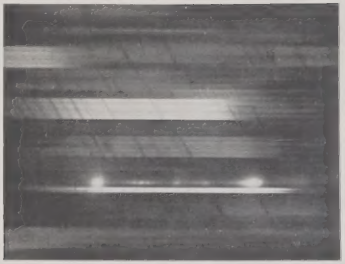
SPECTRES DE COMÈTES OBTENUS AU PRISME-OBJECTIF

PAR A. DE LA BAUME-PLUVINEL et F. BALDET.



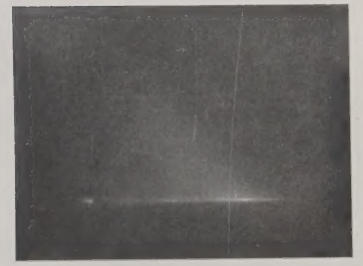
COMÈTE MORRHOUSE 1908 c.

Le 18 octobre 1908. Pose = 3 h. 57 m. r = 1,49.
68 jours avant le passage au périhélie q = 0,94.



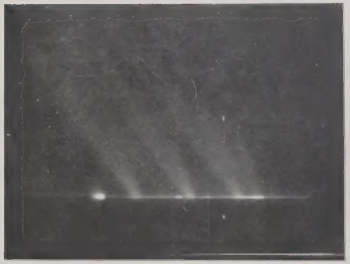
COMÈTE BROOKS 1911 c.

Le 27 août 1911. Pose 5 h. 0 m. r = 1,58.
61 jours avant le passage au périhélie q = 0,49.



GRANDE COMÈTE 1910 a.

Le 29 janvier 1910. Pose 0 h. 22 m. r = 0,49.
12 jours après le passage au périhélie q = 0,13.



COMÈTE BROOKS 1911 c.

Le 31 octobre 1911. Pose 0 h. 23 m. r = 0,80.
4 jours après le passage au périhélie q = 0,49.

r = distance au Soleil et q = distance périhélie en unités astronomiques.

D.R. 9/2/49

483665

Baldet, Fernand
La constitution des comètes.

As
B

DATE.

NAME OF BORROWER.

University of Toronto
Library

DO NOT
REMOVE
THE
CARD
FROM
THIS
POCKET

Acme Library Card Pocket
LOWE-MARTIN CO. LIMITED